DOI: 10.5846/stxb201611282429
万丹,梁博,聂晓刚,喻武,张博.西藏色季拉山土壤物理性质垂直地带性.生态学报,2018,38(3):1065-1074.
Wan D, Liang B, Nie X G, Yu W, Zhang B.Research on vertical zonation of soil physical properties in Sygera Mountain, Tibet.Acta Ecologica Sinica, 2018,38(3):1065-1074.

西藏色季拉山土壤物理性质垂直地带性

万 丹[1,2,*], 梁 博[1,2],聂晓刚[1,2],喻 武[1,2],张 博[1,2]
1 西藏农牧学院资源与环境学院,林芝 860000
2 西藏农牧学院高寒水土保持研究中心,林芝 860000

摘要:以色季拉山为代表的藏东南高原山地的水土流失已成为区域生态环境的重要问题。对色季拉山不同海拔梯度土壤物理性质进行分析,结果表明:(1)除海拔 3600、4200m 外,土壤容重随土层深度增加而增大;总孔隙度、毛管孔隙度随土层深度增加而减小;非毛管孔隙度随土层变化无明显规律;饱和含水率、毛管含水率、田间持水率均随土层深度增加而减小。(2)不同海拔梯度,土壤容重总均值、总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度变化范围分别为:0.58—1.10g/cm^3、57.00%—72.47%、53.33%—67.59%和 3.20%—4.87%。饱和含水率、毛管含水率、渗透性具有相同规律,均为 3800、3400m 处最大,3200m 和 3600m 处最小,4000—4600m 居中,田间持水率随海拔梯度变化呈 M 型波动性趋势。(3)土壤物理性质具有较强的空间异质性,各指标间有明显的空间自相关现象。土壤物理性质各指标在不同土层和海拔间有较明显的差异性,人为干扰也是导致土壤物理性质空间异质性的重要原因。(4)总体上,色季拉山表层土壤(0—10cm)物理结构优于深层次(>10—30cm)土壤;3200m 和 3600m 处最差,4000—4600m 居中,3400—3800m 最佳。研究结果提示,以色季拉山为代表的藏东南原始森林地带,土壤结构脆弱,为保持水土,应防止旅游和森林生产经营的过度开发。

关键词:色季拉山;土壤物理性质;海拔梯度;水土保持

Research on vertical zonation of soil physical properties in Sygera Mountain, Tibet

WAN Dan[1,2,*] ,LIANG Bo[1,2], NIE Xiaogang[1,2], YU Wu[1,2],ZHANG Bo[1,2]
1 *Department of Resources and Environment, XiZang Agricultural and Animal Husbandry College, Linzhi* 860000, *China*
2 *Research Center of Soil and Water Conservation in Alpine-cold Region, XiZang Agricultural and Animal Husbandry College, Linzhi* 860000, *China*

Abstract: Soil and water loss in the southeastern plateau of Tibet, particularly in Sygera Mountain has become an important problem in regional ecological environment. The soil physical properties of Sygera Mountain at different altitude gradients were analyzed. The results showed that: (1) soil bulk density increased with the increase in soil depth at different elevations, except for 3600m and 4200m. The total porosity and capillary porosity decreased with soil depth at different elevations. The non-capillary porosity was not significantly related to the soil layer. The saturated soil water content, capillary water content, and field capacity decreased with the increase in soil depth at different elevations. (2) The soil bulk density, total porosity, capillary porosity, and non-capillary porosity at different elevations ranged from 0.58—1.10g/cm^3, 57.00%—72.47%, 53.33%—67.59%, and 3.20%—4.87%, respectively. The saturated water content, capillary water content, and permeability followed a similar trend, with the maximum values at an elevation of 3800m and 3400m, minimum values at 3200m and 3600m, and intermediate values in the summit area (4000—4600m). Field capacity plotted against altitude revealed an M-shaped trend. (3) The soil physical properties at different elevation had a strong spatial

基金项目:国家自然科学基金(41461063,41661061);西藏自治区科技厅自然基金项目(2016ZR-NY-04)
收稿日期:2016-11-28; **网络出版日期**:2017-10-18

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wandan9250@ 126.com

heterogeneity, and the indices revealed spatial auto-correlation with each other. Significant differences in soil physical properties were present among different soil layers and elevations. Moreover, human disturbance was an important reason underlying the spatial heterogeneity of soil physical properties. (4) In general, physical properties of surface soil (0—10 cm) at Sygera Mountain were better than that of deeper soil layers (10—30cm or more). However, physical properties of surface soil at the foot of the mountain (3200m) and 3600m were the worst, whereas those in the summit area (4000—4600m) were intermediate, and those in the hillside areas (3400, 3800m) were the best. The present study indicated that soil structure was vulnerable in the virgin forest areas of Sygera Mountain, southeast Tibet. Therefore, tourism, and forest industrial production and management, should be better managed in order to maintain the ability of this forest to conserve water and soil.

Key Words: Sygera Mountain; soil physical property; altitude gradient; water and soil conservation

土壤作为生态系统中重要的生态因子,在水平及垂直地带性上受到外界不同环境的影响,物理性质空间异质性明显。一般认为,土壤物理性质受到气候、母岩、地形、植被、动物以及区域差异的影响[1],这些影响因素使土壤形成各种类型,并且使其性质存在明显的差异[2-4]。对于山地自然综合体来说,土壤物理性质在很大程度上受到各种因素的垂直性规律分布影响,导致山地土壤在海拔梯度上呈现明显的垂直分布特征[5-7],进而使不同海拔土壤蓄水保水能力及抗侵蚀能力存在差异。诸多的研究结果也表明,土壤物理性质在垂直地带性上存在明显分异特征。汤萃文等[5]研究了迭部扎尕那地区山地土壤的垂直分带性,认为扎尕那地区土壤山地特征非常明显,随海拔升高呈现出规律性垂直分布特征;何方永等[8]研究了岷江冷杉原始林土壤物理性质与海拔梯度的关系,认为土壤物理性质随海拔梯度变化突出。陈双林等[9]分析了海拔对毛竹林土壤物理性质和水分特性的影响,也得出不同海拔梯度间土壤物理性质存在一定差异性的结论。然而由于土壤物理性质本身的异质性,以至环境和人为因素对土壤物理性质影响的规律或变化趋势仍不明确[10]。随着计算机技术的进步,运算能力增强,模型的广泛应用,对土壤空间异质性问题的研究越来越重视。

西藏东南部的色季拉山,分布着广袤的未经开发的原始森林,是我国生态系统的天然屏障,对整个青藏高原的大气环流、水汽输送、气候变化和生态平衡起着巨大的调节作用,对形成藏东南森林气候起主导作用[11]。区域内高山峡谷交错,山高坡陡,地貌错综复杂,气候多样,雨量充足,导致土壤质地状况分布不均且稳定性差,极易发生水土流失,严重影响到该区生态系统的稳定性。近年来,我国学者对色季拉山的生态、植被、水文等进行了大量的研究[12-17],但对土壤物理性质垂直地带性规律的研究鲜有报道。因此,本文试图对色季拉山不同海拔梯度和土层深度间的土壤物理性质进行分析,以期为藏东南高原山地的生态、植被、水文等方面的研究提供基础数据,特别是为建立高原山地土壤侵蚀预测预报模型研究工作奠定基础,为该区开展水土保持工作提供科学理论依据。

1 研究区概况

色季拉山位于藏东南林芝县境内,雅鲁藏布江大拐弯西北侧,属念青唐古拉山余脉。地理坐标为93°12′—95°35′E,29°10′—30°15′N,北高南低,海拔落差大,海拔分布为2200—5300m。该区受印度洋暖湿季风气候影响较大,属亚高山温带半湿润气候。冬温夏凉,干湿季分明,年均相对湿度78.8%,年均降水量1134.1mm,蒸发量544.0mm,占年均降水量的48.0%,雨季(6—9月)降雨充沛,占全年降水的75.0%—82.0%,尤以8月降雨最多,平均294.2mm,占全年降水的30.0%。年平均气温-0.7℃,最高月平均气温9.2℃,最低月平均气温-14.0℃,极端最低气温-31.6℃,极端最高气温24.0℃,年均日照时数1150.6h,日照百分率26.1%;日照时数最高月为12月的151.7h,日照百分率为40.0%。色季拉山现有植被属原始森林,覆盖良好,种类比较丰富,主要建群树种为急尖长苞冷杉(*Abies georgei var. smithii*)、高山松(*Pinus densata*)、林芝云杉(*Picea likiangensis var. linzhiensis*)、方枝柏(*Sabina saltuaria*)、西藏箭竹(*Fargesia setosa*)等,林下灌木杜鹃

(*Rhododendron simsii*)、忍冬(*Lonicera japonica*)繁茂,苔藓层发达。土壤以酸性棕壤土为主,土层较厚。

2　研究方法

2.1　采样方案

2015 年 9 月,在色季拉山西坡沿海拔 3200—4600m,以 200m 为一个梯度,共设置 8 个样地,每个样地选择 3 个样点重复。在每个样点分 0—10cm、>10—20cm、>20—30cm3 个土层深度,每层取 1 个铝盒土样和 4 个环刀土样,进行编号,分别用以测定持水量(田间持水率、饱和含水率、毛管含水率)、土壤容重、土壤孔隙度(总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度)以及土壤渗透性等各项物理指标。

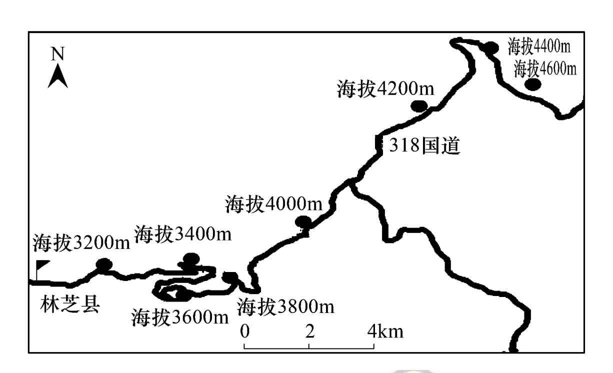


图 1　采样路线图

Fig.1　Sampling roadmap

表 1　样地基本情况

Table 1　Basic information of the research sites

海拔 Altitude/m	经纬度 Longitude and latitude		坡度 Falling gradient/(°)	坡向 Aspect	主要植被类型 Main plant types	植被盖度 Vegetation coverage	人为干扰程度 Human disturbance degree
3200	29°33′58.23″ N	94°32′20.26″ E	25	东北	人工云杉林等	0.80	强烈
3400	29°34′03.33″N	94°33′38.37″ E	32	东南	川滇高山栎、林芝云杉等	0.80	较强
3600	29°33′26.61″N	94°33′31.67″E	37	东北	西藏箭竹、林芝云杉等	0.85	强烈
3800	29°33′45.01″N	94°34′13.03″E	40	西南	急尖长苞冷杉、林芝云杉等	0.70	微弱
4000	29°34′41.61″N	94°35′19.17″E	36	西南	急尖长苞冷杉、林芝云杉等	0.65	弱
4200	29°36′40.66″N	94°37′02.76″E	27	东南	急尖长苞冷杉、雪层杜鹃等	0.80	弱
4400	29°37′39.66″N	94°38′07.55″E	31	西南	雪层杜鹃、散鳞杜鹃灌丛等	0.85	弱
4600	29°36′08.38″N	94°39′00.27″ E	30	西南	散鳞杜鹃、扫帚岩须等	0.70	弱

2.2　测试方法与数据处理

土壤容重测定采用环刀法(环刀体积为 100cm^3)。土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、饱和含水率、毛管含水率的测定采用环刀法和浸水法;田间持水率采用环刀法;土壤渗透性测定采用等水头双环刀法。各物理性质测定与计算参照中华人民共和国林业行业标准《森林土壤分析方法》[18]。数据统计与处理采用经典统计处理方法,计算土壤物理性质的平均值、最大值、最小值和标准差。显著性分析采用 ANOVA 完成,相关性分析通过双变量 Pearson 相关分析完成,图表制作采用 Excel 2010 和 SPSS 17.0 统计软件完成。

3　结果与分析

3.1　土壤容重

土壤容重是土壤最基本的物理性质之一,对土壤的通气性、渗透性、持水性、植被生长以及溶质迁移特征和土壤侵蚀能力的影响非常重要[19-20]。由表 2 可见,土壤容重随土层加深有增大趋势,但在海拔 3600m 处,0—10cm 土壤容重最大,>10—20cm 层次最小,海拔 4200m 处与其相反。除人为干扰频繁的 3200、3600m 和山顶 4600m 处,其余海拔不同土层深度土壤容重均有显著差异(P<0.05)。同一层次不同海拔上,0—10cm 土壤容重 3200m 与 3600m 差异不显著(P>0.05),但均显著大于(P<0.05)其他海拔,4000—4600m 显著大于(P<0.05)3800、3400、3800m 在同一个水平(P>0.05),3800m 土壤容重最小。>10—20cm 层次,海拔 3200、3600、

4200、4400m 处无显著差异($P>0.05$),但均显著大于($P<0.05$)其他海拔,其余各海拔间无显著差异($P>0.05$)。>20—30cm 层次,海拔 3200、3600、4400m 显著大于($P<0.05$)其他海拔,3400、4000m 海拔显著大于($P<0.05$)剩下的 3 个海拔,4200m 和 4600m 海拔土壤容重显著大于($P<0.05$)3800m。

土壤容重总均值,不同海拔变化明显,变化范围在 0.58—1.10g/cm^{3}之间,其中 3200m 最大;3400—3800m 整体较小(3600m 除外),海拔 3800m 处最小;4000—4600m 居中,且 4 个海拔间差异较小,土壤容重总均值由大到小分别为:3200、3600、4400、4000、4200、4600、3400、3800m。土壤容重总均值,受人为影响较强的 3200、3600m 和 4400m 处于同一水平($P>0.05$),但均显著大于($P<0.05$)其他海拔,受人为干扰少的 3400、3800m 与 4000—4600m 具有显著性差异($P<0.05$)。

3.2 土壤孔隙度

土壤孔隙直接影响土壤通气、水分保持与运移、根系穿插等因素,反映土壤潜在蓄水和调节降水的能力[21-22]。由表 2 可知,随土层加深,总孔隙度、毛管孔隙度均有减小趋势,与容重呈相反规律。非毛管孔隙度除 3600m 外,0—10cm 土层均大于>10—20cm 和>20—30cm 层次,深层次土壤(>10—30cm)中非毛管孔隙度随土层深度增加而加大。总孔隙度和毛管孔隙度,4000m 和 4400m 处均随土层加深显著减小($P<0.05$)。非毛管孔隙度除 3200、3600、4400m,其余各海拔土层间变化显著($P<0.05$)。总孔隙度和毛管孔隙度在 0—10cm 土层中,除 3200m 和 3600m 处均显著小于($P<0.05$)其他海拔外,其余各海拔差异不显著($P>0.05$),总孔隙度变幅为 66.56%—76.61%,毛管孔隙度变幅为 63.30%—70.39%。>10—20cm 层次中,土壤总孔隙度、毛管孔隙度随海拔变化规律相似,即 3400m 和 3800m 最大,显著大于($P<0.05$)3200、3600m,且 3200m 和 3600m 最小,其余各海拔间基本处于同一水平,差异不显著($P>0.05$)。>20—30cm 层次中,土壤总孔隙度 3400、3800、4200m 最大,显著大于($P<0.05$)3200m 和 4400m,且 4400m 最小,其余各海拔间差异不显著($P>0.05$)。非毛管孔隙度,0—10cm 土层,海拔 3800m 显著($P<0.05$)大于其余 7 个海拔,4600m 海拔显著大于($P<0.05$)其余 6 个海拔,3400、4000、4400m 显著大于($P<0.05$)3600m 和 4200m,3200m 显著大于($P<0.05$)3600m,3600m 最小。>10—20cm 土层,4600m 显著大于($P<0.05$)其他各海拔,4000、4200m 显著小于($P<0.05$)其他海拔,其余各海拔处于同一水平($P>0.05$)。>20—30cm 层次,4000、4200m 最大,显著大于($P<0.05$)其他海拔,3400m 和 4600m 显著小于($P<0.05$)其他 6 个海拔,其余各海拔间差异不明显($P>0.05$)。>10—30cm 深层次土壤中,除 4600m 外,非毛管孔隙度随深度加深呈增加趋势。从总均值来看,总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度三者变化范围分别为:57.00%—72.47%、53.33%—67.59%和 3.20%—4.87%。总孔隙度和毛管孔隙度值由大到小均为:3800、3400、4200、4600、4000、4400、3600、3200m;非毛管孔隙度由大到小依次为 3800、4400、4600、3400、3200、4200、4000、3600m。总孔隙度、毛管孔隙度,3200、3600m 均显著小于($P<0.05$)其余海拔梯度,3400、3800m 显著大于($P<0.05$)4000—4600m。非毛管孔隙度 3800、4400、4600m 显著大于($P<0.05$)除 4000m 外的其他 4 个海拔,3200、3400m 和 4200m 显著大于($P<0.05$)3600m,但与 4000m 无显著差异($P>0.05$)。对不同海拔梯度土壤容重与总孔隙度、毛管孔隙度进行逐步回归分析,得出 Y_1(总孔隙度)= $0.874-0.265X_1$(容重)($R^2=0.774$, $P<0.01$);Y_2(毛管含水率)= $0.822-0.250X_1$($R^2=0.724$, $P<0.01$)。分析说明:总孔隙度、毛管孔隙度均与容重呈负相关。

3.3 土壤水分

土壤对各种水分的调节与控制性能(饱和含水率、毛管含水率、田间持水率)能较好地反映林地土壤的保水、供水能力,也能直接影响土壤抗水蚀能力。

3.3.1 饱和含水率与毛管含水率

由表 3 可知,总体上,各海拔土壤饱和含水率和毛管含水率均随土层深度增加而减小,除 3200m 和 3600m 外,其余各海拔均显著减小($P<0.05$)。0—10cm、>10—20cm 土层饱和含水率、毛管含水率最小值分别在海拔 3600m 和 3200m,>20—30cm 土层两者最小值出现在海拔 4400m 处。表层土(0—10cm)中饱和含水率变化范围为 50.77%—205.08%,毛管含水率变化范围为 48.21%—187.70%;>10—30cm 深层次土壤中饱和含水率变化范围为 45.81%—110.75%,毛管含水率变化范围为 41.47%—103.31%。可见表层土壤(0—10cm)在持水性

表 2　不同海拔梯度土壤容重、孔隙度变化特征

Table 2　Variations of soil bulk density and porosity at different altitudes

物理指标 Physical index	土层深度 Soil depth/cm	海拔 Altitude/m 3200	3400	3600	3800	4000	4200	4400	4600
土壤容重	0—10	1.06±0.01a	0.50±0.12cdC	1.12±0.02a	0.36±0.02dB	0.58±0.17bcC	0.76±0.01bA	0.68±0.02bcC	0.78±0.05b
Soil bulk density/ (g/cm^3)	>10—20	1.10±0.01a	0.65±0.17bB	0.99±0.11a	0.69±0.06bA	0.78±0.25bB	0.93±0.06aB	0.91±0.01aB	0.79±0.07b
	>20—30	1.14±0.01a	0.86±0.03bcA	1.04±0.09a	0.70±0.01eA	0.98±0.04bA	0.78±0.04dA	1.17±0.08aA	0.80±0.02d
	总均值	1.10±0.14a	0.67±0.09d	1.05±0.04a	0.58±0.07d	0.84±0.11bc	0.83±0.04bc	0.92±0.09a	0.80±0.02bc
总孔隙度	0—10	57.64±0.23b	73.76±1.23a	56.39±0.72b	76.61±1.06a	69.11±3.42aA	66.56±0.45a	72.01±0.03aA	70.24±2.51aA
Total porosity/%	>10—20	57.45±1.61c	69.85±0.34a	59.35±2.77bc	72.15±0.45a	61.03±7.99abAB	61.20±0.24ab	64.29±0.96abA	64.33±4.08abAB
	>20—30	55.91±0.88b	65.80±1.28a	59.40±3.39ab	68.65±3.34a	59.77±0.01abB	66.58±0.69a	52.00±5.01bB	58.54±2.81abB
	总均值	57.00±0.59c	69.80±1.88a	58.38±1.31c	72.47±1.42a	63.30±3.28b	64.45±0.86b	62.77±4.10b	64.37±0.19b
毛管孔隙度	0—10	53.65±0.56c	69.51±0.82ab	53.56±0.19c	70.39±0.55a	64.83±3.25abA	63.30±0.13b	67.81±0.39abA	64.89±2.32ab
Capillary porosity/%	>10—20	54.14±1.26c	66.12±0.60a	56.20±1.88bc	67.45±0.50a	58.72±7.98abAB	58.53±0.36ab	60.42±1.59abA	59.91±2.94ab
	>20—30	52.21±0.21bc	62.47±0.82a	55.76±3.57ab	64.94±3.82a	54.47±1.50abB	60.54±0.24ab	47.89±5.73cB	56.05±2.25ab
	总均值	53.33±0.51c	66.36±1.87a	55.17±1.22c	67.59±1.24a	59.67±3.40b	60.79±0.74b	58.71±4.35b	60.28±1.83b
非毛管孔隙度	0—10	3.99±0.79dc	4.25±0.41cA	2.83±0.53e	6.22±0.51aA	4.28±0.18cA	3.26±0.32dAB	4.21±0.42c	5.35±0.19bA
Non-capillary porosity/%	>10—20	3.32±0.36b	3.15±0.93bB	3.15±0.89b	3.71±0.95abAB	2.31±0.01cB	2.67±0.60cA	3.87±0.63ab	4.42±1.15aA
	>20—30	3.70±0.67b	3.33±0.46cAB	3.64±0.19bc	3.72±0.48bA	5.30±1.49aA	5.04±0.45aB	4.11±0.72b	2.49±0.57dB
	总均值	3.67±0.31b	3.77±0.30b	3.20±0.29c	4.87±0.61a	3.63±0.44ab	3.66±0.24b	4.40±0.36a	4.09±0.41a

不同小写字母表示同一土层,不同海拔间差异性显著(P<0.05) ,不同大写字母表示同一海拔,不同土层间差异显著(P<0.05) ,如土层间均不显著未标出

表 3　不同海拔土壤水分特征

Table 3　Soil water characteristics at different altitudes

物理指标 Physical index	土层深度 Soil depth/cm	海拔 Altitude/m 3200	3400	3600	3800	4000	4200	4400	4600
饱和含水率	0—10	54.38±0.28d	155.14±3.92aA	50.77±1.34d	205.08±13.06aA	141.92±14.59bA	92.62±0.30cA	110.04±2.56bA	90.41±8.46cA
Saturated water content/%	>10—20	55.13±4.45c	110.75±2.87aB	61.21±9.66c	104.45±7.44aB	72.02±12.62bB	71.20±3.87bC	73.32±1.57bB	84.96±10.31bAB
	>20—30	49.11±0.62ef	71.83±1.21cdC	58.23±7.99def	96.61±2.89aC	63.04±2.33deC	89.34±5.03abB	45.81±7.54fC	79.37±5.48bcB
	总均值	52.87±1.67c	112.57±1.97a	56.73±3.80c	135.38±12.24a	92.33±12.09b	84.39±4.52b	76.39±11.95b	84.92±4.23b
毛管含水率	0—10	50.63±0.99d	145.78±3.61aA	48.21±0.83d	187.70±11.30aA	135.62±14.39bA	87.03±0.67cA	103.81±0.30bA	86.10±7.96cA
Capillary water content/%	>10—20	51.94±3.95c	103.31±2.82aB	57.88±8.39c	99.11±8.41aB	68.42±12.51bB	67.29±4.28bB	69.04±2.24bB	79.39±8.56bA
	>20—30	45.86±0.04e	66.81±1.56cC	55.67±7.97de	91.29±3.68aB	58.59±0.66cdB	84.13±4.21abA	41.47±7.84eC	73.75±4.64bcB
	总均值	49.48±1.57c	105.30±1.87a	53.92±3.52c	126.04±19.91a	87.54±12.01b	79.48±4.19b	71.44±11.63b	79.75±3.95b
田间持水率	0—10	42.15±6.50bA	82.08±3.49aA	86.55±14.53aA	136.72±13.71aA	87.99±12.18aA	103.68±12.68aA	79.44±1.29abA	57.16±6.38b
Field capacity/%	>10—20	29.51±3.48bB	60.72±19.74abB	61.72±12.41abB	75.37±2.11aB	58.83±9.39abB	39.94±6.61abB	49.04±10.48abB	52.44±3.22ab
	>20—30	29.21±1.41bB	49.42±4.74aC	48.36±3.14abC	51.87±6.89aC	62.58±8.16aB	39.30±6.49abB	35.21±19.65abB	49.06±0.36a
	总均值	33.63±3.32b	64.07±12.05ab	65.54±15.05ab	87.98±18.73a	54.67±6.64ab	60.97±15.37ab	54.56±10.07ab	52.89±2.37b

能力上优于深层次土壤(>10—30cm)。受土壤容重和孔隙度的影响,0—10cm、>10—20cm 两个层次土壤饱和含水率、毛管含水率均为 3400、3800m 显著大于(P<0.05)其他 6 个海拔,3200m 和 3600m 显著小于(P<0.05)其余 6 个海拔。>20—30cm 层次土壤饱和含水率、毛管含水率,均为 3800m 显著大于(P<0.05)除 4200m 以外的所有海拔,3200、3600m 除与 4000、4400m 无显著差异(P>0.05)外,均显著小于(P<0.05)其他 4 个海拔。从总均值来看,饱和含水率、毛管含水率具有相同规律,即 3400m 和 3800m 间不显著(P>0.05),但显著大于(P<0.05)其余 6 个海拔,3200m 与 3600m 差异不显著(P>0.05),但显著小于(P<0.05)其余 6 个海拔,其余各海拔间差异不明显(P>0.05)。由此看出,在不同海拔梯度上,饱和含水率与毛管含水率均呈明显垂直分异规律,两者总均值均为 3800m 处最大,3200m 处最小,4000—4600m 值居中。饱和含水率和毛管含水率总均值从大到小均依次为:3800、3400、4000、4600、4200、4400、3600、3200m。

经过对不同海拔梯度饱和含水率、毛管含水率进行逐步回归分析,得到回归方程 Y_3(饱和含水率)= 3.340 −1.996X_1(容重)−1.279X_2(毛管孔隙度)(R^2=0.895,P<0.01);Y_4(毛管含水率)= 2.142−1.567X_1(R^2=0.890,P<0.01),表明饱和含水率、毛管含水率受到容重影响最大,其次为土壤孔隙度。

3.3.2 田间持水率

田间持水率大小与土壤的结构、质地、有机质含量以及土地利用状况有关[23]。表 3 显示,田间持水率除海拔 4600m 外,均随土层加深显著减小(P<0.05),土层深度 0—10cm 至>10—20cm 田间持水率的减小程度比>10—20cm 至>20—30cm 减小程度更为明显。土层深度 0—10cm 和>10—20cm,田间持水率均为海拔 3800m 处最大;>20—30cm 层次,田间持水率在海拔 4000m 处最大。表层土壤(0—10cm)田间持水率变化范围在 42.15%—136.72%,深层次土壤(>10—30cm)变化范围在 29.21%—75.37%。表层土壤变化范围远大于深层次土壤变化范围,这是因为表层土壤更新速度快,受地表植物的影响,土壤结构良好,容重偏低,孔隙比率高,导致土壤通透性和持水能力强。从同一土层不同海拔来说,0—10cm 层次,除海拔 4400m 外,田间持水率海拔 3200、4600m 处均显著小于(P<0.05)其余 5 个海拔,其余各海拔间处于同一水平(P>0.05)。>10—20cm 层次,田间持水率仅 3200m 处显著小于(P<0.05)3800m,其余各海拔无明显差异(P>0.05)。>20—30cm 层次,田间持水率 3200m 处显著小于(P<0.05)3400、3800、4000、4600m,其余各海拔间无明显差异(P>0.05)。从总均值来看,田间持水率 3800m 处显著大于(P<0.05)3200、4600m,其余各海拔无显著差异(P>0.05),各海拔间,3800m 最大,3200m 最小。田间持水率随海拔梯度变化呈 M 型波动性趋势,在海拔 3200m 至海拔 3800m 阶段,呈增大趋势,且增加幅度较大,到海拔 4000m 处又急剧减小,随后上升,再下降。田间持水率由大到小依次为:3800、3600、3400、4200、4000、4400、4600、3200m。

3.4 土壤渗透性

土壤渗透性是土壤重要的水分物理性质之一,也是对土壤的保水蓄水以及抗水蚀能力反映的重要指标。土壤渗透性的好坏,与地表产生径流的大小有着直接的关系,渗透性越好,地表径流越少,土壤侵蚀量也会相应减少[24-26]。

土壤渗透性是土壤垂直方向上物理结构最直接的描述指标之一,更注重整体性的比较。因此通过对 0—30cm 不同土层土壤渗透性指标值进行均化处理,得出土壤平均渗透性结果值,如图 2。初始渗透率、稳定渗透率、平均渗透率均随海拔呈明显垂直地带性规律,除 3600m 海拔较为特殊外,三个指标值均为 3400—3800m >4000—4600m>3200m。其中 3200—3800m 变化幅度较大,在 4000—4600m 变化幅度最小,三者最大值均出现在 3800m,最小值出现在 3200m,最大值分别高出最小值 95.91%、93.45%、94.34%。初始渗透率,海拔 3800m 显著大于(P<0.05)3200、4000、4200、4400、4600m;稳定渗透率,3200m 显著小于(P<0.05)3400m 和 3800m,其他海拔间无显著差异(P>0.05);平均渗透率,3800m 海拔显著大于(P<0.05)3200、3600、4200、4400、4600m,而 3200、3600、4200、4400、4600m 之间无显著差异(P>0.05)。3400—3800m 渗透速率总体上高于 4000—4600m,这就使得在高海拔处未能及时入渗的水量在地表形成径流后在山腰处能够得到有效的拦截,减少水土的流失。

3.5 各土壤物理性质指标间相关性

为研究色季拉山土壤各项物理指标随海拔梯度变化的垂直分异特征及各项指标相互影响程度,对土壤的各项物理性质指标进行了相关性分析。表 4 给出了各项指标间的相关性指数以及显著程度。结果表明:66 对相关关系中有 35 对达到了显著或极显著相关水平,53%的较高频率与张晓存评价土壤质量指标数据集的相互关联程度一致[27],表明所研究土壤物理性质指标间具有一定的相关性,可为进一步选取土壤质量评价指标提供依据。由表 4 可知,总孔隙度、毛管孔隙度与土壤容重呈极显著负相关($P<0.01$),非毛管孔隙度与土壤容重呈显著负相关($P<0.05$),这与以往大多数研究结果[28-29]相同。容重与海拔呈不显著($P>0.05$)负相关,相关系数仅为 0.156。土壤总孔隙度和毛管孔隙度与海拔呈显著($P<0.05$)正相关。饱和含水率以及毛管含水率与容重呈极显著负相关关系($P<0.01$),说明土壤含水率受到土壤容重影响较大,容重越小,证明土壤质地越疏松,越能够存储大量的水分。

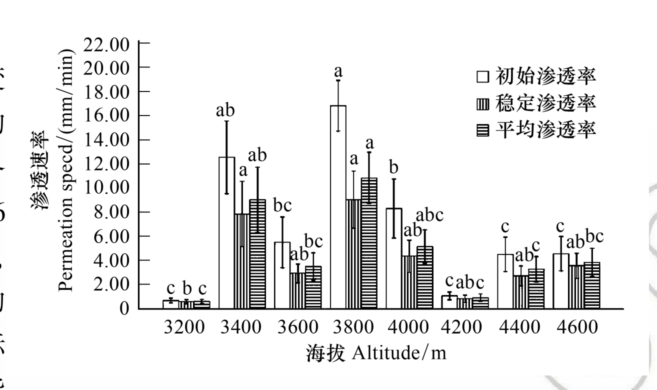


图 2　0—30cm 土层土壤渗透性能随海拔变化特征

Fig.2　Characteristics of soil permeability (0—30cm) at different altitudes

饱和含水率、毛管含水率、田间持水率与海拔有一定的正相关关系,与土层之间呈极显著负相关关系($P<0.01$),这证明此 3 要素在垂直海拔梯度上有一定的分异规律,浅层次土壤比深层次土壤的保水蓄水能力更强。初始渗透率、稳定渗透率均与容重呈极显著负相关($P<0.01$),与海拔呈非显著负相关关系($P>0.05$)。平均渗透率与土壤容重呈负相关关系,但不显著($P>0.05$)。初始渗透率、稳定渗透率和平均渗透率均与总孔隙度、毛管孔隙度呈正相关关系,而初始渗透率与非毛管孔隙度呈显著正相关关系($P<0.05$),说明渗透性能受非毛管孔隙度影响较大。由此看出,在海拔梯度上,土壤总孔隙度、毛管孔隙度垂直分异规律最强,在土层深度上,除非毛管孔隙度、渗透性能外,其余各项指标均呈现出较强的分异特征。

4　讨论与结论

4.1　讨论

因高原山地海拔垂直变化较大,导致综合生态环境差异,使坡面土壤各基本物理指标垂直分布特征明显。研究结果表明:表层(0—10cm)土壤物理基本指标优于深层次(>10—30cm)土壤,这是因为表层土壤植被根系发达,微生物活动量大,枯枝落叶分解较多,腐殖层厚,使表层土壤比深层土壤更为疏松,孔隙度较高,蓄水保水能力较强,这与以往大多数研究结果一致[30-32]。但在海拔 3600m 处,由于高强度且频繁的人类活动干扰,表层土壤被反复踩踏,使土壤变得紧密,从而使其容重偏大,孔隙度、饱和含水率、毛管含水率偏小。

山顶地带,植被稀疏,林分向单一林种过度,植被多以灌草结合为主,腐殖层较薄,且随海拔的增高,地表接受的太阳辐射增强,昼夜温差较大,物理风化盛行,土壤表面覆盖大量的砾石,土壤微生物活动趋弱,土壤趋于原始发育阶段变化,从而使山顶地带各项物理指标均弱于山体中部地带。山体中部除 3600m 海拔处外,人为干扰强度极低,分布有大量郁闭度极高的云冷杉林,林内潮湿,大量枯落物在微生物作用下,分解成腐殖质,土壤疏松,更新较快。同时,山顶坡面径流携带大量土壤颗粒及有机质运移至山腰地带,使区域内土壤黏粒增加,这些都有效地改善了土壤结构,很好地拦截和储蓄了水土,起到保持水土的作用。3200m 和 3600m 位置,很明显受高强度的人为活动影响,土壤紧实,通透性差,土壤各项物理指标值较差。研究结果较为真实地反映了人与自然环境对土壤结构、性状的影响。植被和气候环境等自然因素是土壤保持良好结构的重要原因,人类活动也是影响土壤物理性质的重要因素之一。以色季拉山为代表的藏东南森林地带,土壤结构极为脆弱,易破坏,难恢复。因此在旅游开发、森林生产经营过程中,应特别注意保护好地表覆盖物,减小扰动强度。

表 4 各项物理指标间及与海拔土层间的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between the Physical indexes and soil layer at different altitudes

指标 Index	容重 Soil bulk density/ (g/cm^3)	总孔隙度 Total Porosity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity/%	饱和含水率 Saturated water content/%	毛管含水率 Capillary water Content/%	田间持水率 Field capacity/%	初渗率 Initial infiltration rate/ (mm/min)	稳渗率 Stable infiltration rate/ (mm/min)	平均渗透率 Average infiltration rate/ (mm/min)
总孔隙度 Total porosity/%	-0.880**									
毛管孔隙度 Capillary porosity/%	-0.851**	0.989**								
非毛管孔隙度 Non-capillary porosity/%	-0.328*	0.228	0.082							
饱和含水率 Saturated water content/%	-0.94**	0.780**	0.741**	0.375**						
毛管含水率 Capillary water content/%	-0.943**	0.789**	0.756**	0.343*	0.999**					
田间持水 Field capacity/%	-0.538**	0.432**	0.428**	0.09	0.613**	0.613**				
初渗率 Initial infiltration rate/(mm/min)	-0.383**	0.245	0.2	0.333*	0.404**	0.393**	0.326**			
稳渗率 Stable infiltration rate/(mm/min)	-0.257**	0.199	0.198	0.033	0.206	0.209	0.234	0.761**		
平均渗透率 Average infiltration rate/(mm/min)	-0.279	0.223	0.221	0.047	0.236	0.237	0.209	0.739**	0.852**	
海拔 Altitude/m	-0.156	0.354*	0.341*	0.142	0.057	0.059	0.04	-0.122	-0.08	-0.038
土层深度 Soil depth/cm	0.372**	-0.420**	-0.430**	-0.003	-0.442**	-0.448**	-0.492**	0.129	0.131	0.131

** 在 0.01 水平(双侧) 上极显著相关; * 在 0.05 水平(双侧) 上显著相关

4.2　结论

(1)随土层加深,土壤容重有增加趋势,总孔隙度、毛管孔隙度均有减小趋势。非毛管孔隙度,除 3200、3600、4400m 外,其余各海拔土层间有显著差异(P<0.05)。从海拔上来说,容重总均值、总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度变化范围分别为 0.58—1.10g/cm^3、57.00%—72.47%、53.33%—67.59%、3.20%—4.87%。不同海拔土壤容重由大到小依次为:3200、3600、4400、4000、4200、4600、3400、3800m;总孔隙度和毛管孔隙度值由大到小依次为:3800、3400、4200、4600、4000、4400、3600、3200m;非毛管孔隙度由大到小依次为 3800、4400、4600、3400、3200、4200、4000、3600m。

(2)饱和含水率和毛管含水率各海拔均随土层深度增加而减小,除 3200m 和 3600m 外,其余各海拔随土层深度增加均显著减小(P<0.05)。表层土壤(0—10cm)在持水性能力上优于深层次土壤(>10—30cm)。田间持水率除海拔 4600m 外,均随土层加深显著减小(P<0.05),土层深度 0—10cm 至>10—20cm 田间持水率的减小程度比>10—20cm 至>20—30cm 减小程度更为明显。从总均值来看,饱和含水率、毛管含水率具有相同规律,即 3800、3400m 处最大,3200m 和 3600m 处最小,4000—4600m 居中,田间持水率随海拔梯度变化呈 M 型波动性趋势。初始渗透率、稳定渗透率、平均渗透率均随海拔呈明显垂直地带性规律,除 3600m 海拔值较为特殊外,3 个指标值均为 3400、3800m 处>4000、4200、4400、4600m>3200m。

(3)色季拉山在海拔和土层上,土壤物理性质具有较强的空间异质性。显著性检验和相关性分析结果表明:土壤各项物理指标表层(0—10cm)异质性要大于深层次土壤(>10—30cm)。在海拔梯度上,山体中部异质性大于山体上部,人为干扰也明显导致了土壤物理性质空间异质性,比如:3200m 和 3600m 是干扰强度极高的地带,土壤物理性质出现了极显著的变异特征。此外,土壤物理性质各指标间有明显的空间自相关现象。

(4)综合各海拔土壤物理性质分析结果,各海拔处土壤物理结构性状表现出较强的规律性,即 3400、3800m 优于 4000—4600m,3200m 和 3600m 处结构最差。茂密的植被覆盖是维持良好土壤结构的重要原因,自然环境自我维护机制得以充分证明,即使在高寒的山顶,气候恶劣,在无人或轻微人为干扰下,自然环境的修养生息也能使土壤保持较好的结构,防止更多水土流失的发生;而频繁、高强度的人为干扰是导致土壤结构退化的重要原因,也容易打破脆弱生态系统平衡。

参考文献(References):

[1] 张晓霞, 杨宗儒, 查同刚, 张志强, 王高敏, 朱聿申, 吕志远. 晋西黄土区退耕还林 22 年后林地土壤物理性质的变化. 生态学报, 2017, 37(2): 416-424.

[2] 王政权, 王庆成. 森林土壤物理性质的空间异质性研究. 生态学报, 2000, 20(6): 945-950.

[3] 高强伟, 代斌, 罗承德, 刘丽, 马丹, 张翠翠. 蜀南竹海毛竹林土壤物理性质空间异质性. 生态学报, 2016, 36(8): 2255-2263.

[4] 牛赟, 刘贤德, 敬文茂, 雷军, 苗毓新. 祁连山北坡土壤特性与植被垂直分布的关系. 山地学报, 2013, 31(5): 527-533.

[5] 汤萃文, 苏研科, 王国亚, 沈永平. 甘肃迭部扎尕那地区山地土壤过程的垂直分带性研究. 冰川冻土, 2013, 35(1): 84-92.

[6] 孙海燕, 万书波, 李林, 刘登望. 贺兰山西坡不同海拔梯度土壤活性有机碳分布特征及影响因子. 水土保持学报, 2014, 28(4): 194-199, 205-205.

[7] 杨帆, 黄来明, 李德成, 杨飞, 杨仁敏, 赵玉国, 杨金玲, 刘峰, 张甘霖. 高寒山区地形序列土壤有机碳和无机碳垂直分布特征及其影响因素. 土壤学报, 2015, 52(6): 1226-1236.

[8] 何方永, 何飞, 吴宗达, 刘世荣, 刘兴良, 彭培好. 岷江冷杉原始林土壤物理性质的海拔梯度变化. 西北师范大学学报: 自然科学版, 2015, 51(5): 92-98.

[9] 陈双林, 杨清平, 郭子武, 邹跃国. 海拔对毛竹林土壤物理性质和水分特性的影响. 林业科技开发, 2010, 24(1): 60-64.

[10] 窦森, 李凯, 崔俊涛, 关松, 张晋京. 土壤腐殖物质形成转化与结构特征研究进展. 土壤学报, 2008, 45(6): 1148-1158.

[11] 何吉成, 罗天祥, 徐雨晴. 藏东南色季拉山急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *smithii*)林线的生态气候特征. 生态学报, 2009, 29(1): 37-46.

[12] 刘合满, 曹丽花, 曾加芹. 藏东南色季拉山沟壑区土壤氮素空间分布特征. 生态学报, 2016, 36(1): 127-133.

[13] 马和平, 郭其强, 李江荣, 周晨霓. 色季拉山 4 种林型土壤呼吸及其影响因子. 土壤学报, 2016, 53(1): 253-260.

[14] 沈志强, 卢杰, 华敏, 方江平. 西藏色季拉山高山松种群点格局分析. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2016, 44(5): 73-81.

[15] 罗大庆, 张晓娟, 任德智. 藏东南色季拉山冷杉林林隙与非林隙小气候比较. 北京林业大学学报, 2014, 36(6): 48-53.

[16] 周晨霓, 马和平. 西藏色季拉山典型植被类型土壤活性有机碳分布特征. 土壤学报, 2013, 50(6): 1246-1251.

[17] 马和平, 郭其强, 刘合满, 钱登锋. 西藏色季拉山土壤微生物量碳和易氧化态碳沿海拔梯度的变化. 水土保持学报, 2012, 26(4): 163-166, 171-171.

[18] 国家林业局. 森林土壤分析方法. 北京: 中国标准出版社, 1999: 1-108.

[19] 柴华, 何念鹏. 中国土壤容重特征及其对区域碳贮量估算的意义. 生态学报, 2016, 36(13): 3903-3910.

[20] 张淑娟, 王道杰, 梅永丽, 常士秋, 王海帆. 泥石流多发区小流域土地利用方式对土壤性质的影响. 水土保持学报, 2015, 29(1): 257-262.

[21] 李宗超, 胡霞. 小叶锦鸡儿灌丛化对退化沙质草地土壤孔隙特征的影响. 土壤学报, 2015, 52(1): 242-248.

[22] 张磊, 王嘉学, 刘保强, 肖梦景, 程艳芳, 许路艳. 喀斯特山原红壤退化过程中土壤表层团聚体变化规律. 山地学报, 2015, 33(1): 8-15.

[23] 贾芳, 樊贵盛. 土壤质地与田间持水率关系的研究. 山西水土保持科技, 2007, (3): 17-19.

[24] 闫建梅, 何丙辉, 田太强, 李天阳, 梅雪梅. 川中丘陵区不同土地利用方式土壤入渗与贮水特征. 水土保持学报, 2014, 28(1): 53-57, 62-62.

[25] 李建兴, 何丙辉, 梅雪梅, 梁艳玲, 熊建. 紫色土区坡耕地不同种植模式对土壤渗透性的影响. 应用生态学报, 2013, 24(3): 725-731.

[26] 刘洁, 李贤伟, 纪中华, 张健, 张良辉, 周义贵. 元谋干热河谷三种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性. 生态学报, 2011, 31(8): 2331-2340.

[27] 张孝存. 东北典型黑土区流域侵蚀—沉积对土壤质量的影响[D]. 西安: 陕西师范大学, 2013.

[28] 李民义, 张建军, 王春香, 王丹丹. 晋西黄土区不同土地利用方式对土壤物理性质的影响. 水土保持学报, 2013, 27(3): 125-130, 137-137.

[29] 张希彪, 上官周平. 人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响. 生态学报, 2006, 26(11): 3685-3695.

[30] 孙浩, 杨民益, 熊伟, 王彦辉, 程积民, 曹恭祥, 刘千, 王亚蕊, 于澎涛. 人为改造措施对六盘山两种典型林分土壤物理性质及其水文功能的影响. 水土保持学报, 2013, 27(6): 103-107, 157-157.

[31] 时雷雷, 骆土寿, 许涵, 林明献, 杨怀, 陈德祥, 李意德. 尖峰岭热带山地雨林土壤物理性质小尺度空间异质性研究. 林业科学研究, 2012, 25(3): 285-293.

[32] 李会科, 张广军, 赵政阳, 李凯荣. 渭北黄土高原旱地果园生草对土壤物理性质的影响. 中国农业科学, 2008, 41(7): 2070-2076.